

بررسی و تحلیل زاویه مخروط سرامیکی و ارائه یک رابطه تجربی

بر حسب سرعت برخورد پرتابه سر مخروطی

در اهداف سرامیک - فلز

مصطفی علیزاده^۱ و خداداد واحدی^۲

دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۹/۰۷)

چکیده

زره‌های سرامیک-فلز یک نوع از زره‌های مرکب بوده که خصوصیات مورد نیاز برای کارایی بهتر یک زره را تأمین می‌نمایند. بررسی دقیق پدیده نفوذ در اهداف سرامیک-فلز به علت ساختار متفاوت سرامیک و فلز بسیار پیچیده و دشوار است و از آنجایی که سرامیک‌ها مواد تردی بوده، سازوکار شکست در آنها نسبت به فلزها متفاوت و پیچیده‌تر می‌باشد. در اثر برخورد پرتابه به سرامیک، یک ترک مخروطی در ضخامت سرامیک گسترش می‌یابد که داشتن رابطه مناسب برای پیش‌بینی زاویه این ترک مخروطی در تحلیل روابط نفوذ در اهداف سرامیک-فلز به‌ویژه در پاسخ لایه پشتیبان (صفحه فلزی) به ضربه بسیار تأثیرگذار است. زاویه گسترش این ترک مخروطی به عوامل- متعددی از جمله جنس سرامیک، سرعت برخورد، نوع پرتابه و غیره بستگی خواهد داشت. با توجه به آزمایش‌های گوناگون در پارامترهای یاد شده سرعت برخورد بیشترین اهمیت را دارا می‌باشد. در مقاله حاضر، اثر سرعت پرتابه با دماغه مخروطی بر زاویه تشکیل این مخروط به‌صورت تجربی بررسی شده و یک رابطه بر حسب سرعت برای نیم‌زاویه مخروطی ارائه شده است. در انتها، با توجه به رابطه به‌دست آمده برای نیم‌زاویه مخروط سرامیکی، مدل تحلیلی فلورانس بهینه شده است.

واژه‌های کلیدی: نفوذ، ذره سرامیکی، ترک مخروطی، پرتابه مخروطی

Analytical and Numerical Investigation of Penetration of Conical Projectiles into FML Targets

M. Alizadeh and Kh. Vahedi

Imam Hossein University

(Received: 03 July, 2013; Accepted: 28 November, 2013)

ABSTRACT

In this paper, development of a new analytical model for expressing the penetration of conical projectiles into fiber metal laminates is presented. For this purpose, the Paul&Zaid theory i.e. an analytical model for calculating the residual velocity of projectile after perforation of metal and Wen theory i.e. an analytical model for calculating the residual velocity and ballistic limit of laminate of composite in impact, are combined. Then the result of this new analytical model is compared with numerical results and a good correlation has been observed, comparing the analytical model presented in this paper to the numerical results.

Keywords: Penetration, Composite Armor, Conoid Angle, Conical Projectile

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): khvahedi@ihu.ac.ir

فهرست علائم

D	قطر پرتابه
a_p	شعاع پرتابه
L	طول پرتابه
M_p	جرم پرتابه
ρ_1	چگالی صفحه جلویی
ρ_2	چگالی لایه پشتیبان
h_1	ضخامت صفحه جلویی
h_2	ضخامت لایه پشتیبان
V_p	سرعت بالستیک
ε_2	کرنش شکست ماده پشتیبان
σ_2	مقاومت نهایی کششی لایه پشتیبان
φ	نیم‌زاویه مخروط سرامیکی

۱- مقدمه

سرامیک‌ها به علت داشتن خواصی مانند دانسیته پایین، مقاومت فشاری بالا و مدول بالک و برشی بالا مدت‌هاست به عنوان یکی از زره‌های حفاظتی در سامانه‌های بالستیکی به کار می‌روند. در کاربردها، معمولاً زره‌های سرامیکی با یک یا چند لایه پشتیبان تقویت می‌شوند. پشتیبان انرژی جنبشی باقی مانده پرتابه را بعد از شکست سرامیک جذب می‌کند و باعث پایداری سرامیک در طی فرآیند نفوذ می‌شود. هر چه ضخامت ورق پشتیبان بیشتر باشد شکست سرامیک در اثر تغییر شکل ورق پشتیبان کمتر خواهد بود. بعد از برخورد پرتابه به یک هدف سرامیکی با لایه پشتیبان فلزی، شکست مخروطی در اثر برگشت امواج کششی اتفاق می‌افتد، این مخروط سرامیکی، بار ناشی از برخورد پرتابه را به سطح وسیع‌تر پایه مخروط روی لایه پشتیبان منتقل می‌کند. تحقیق و بررسی پدیده نفوذ در سرامیک‌ها معمولاً به سه روش انجام می‌پذیرد: ۱- روش‌های تجربی و نیمه تجربی، ۲- روش‌های عددی و ۳- روش‌های تحلیلی. تاکنون مدل‌های مختلفی اعم از مدل‌های عددی، تجربی و تحلیلی در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی ارائه شده است [۱].

در روش عددی به حل کامل تمام معادلات حاکم بر نفوذ با استفاده از روش‌های مختلف مانند تفاضل محدود،^۱ SPH اجزا محدود در محیط‌های پیوسته پرداخته می‌شود. روش‌های عددی برای تحلیل مسائل مرکب و پیچیده مناسب است. اولین تحلیل

عددی قابل ملاحظه بر اهداف سرامیکی توسط ویلکینز^۲ و همکارانش انجام گردید [۲]. این تحلیل عددی با کد تفاضل محدود (HEMP) برای شبیه‌سازی برخورد در ضربات قائم انجام شده است. لی^۳ و همکارانش با استفاده از روش‌های عددی، برخورد یک پرتابه فولادی را در یک زره سرامیکی سبک وزن بررسی کرده‌اند و همچنین به مطالعه پدیده‌هایی همانند فرسایش پرتابه، انتشار ترک، ساختار مخروط سرامیکی و شکست فلز لایه پشتیبان پرداخته‌اند [۳].

مدل‌های تحلیلی بر پایه قوانین فیزیکی نسبتاً ساده بنا شده‌اند و یکی از روش‌های شبیه‌سازی پدیده نفوذ می‌باشند. از جمله مدل‌های تحلیلی ارائه شده در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی می‌توان از مدل تحلیلی فلورانس^۴ که در سال ۱۹۶۹ ارائه گردید، نام برد [۴]. در مدل فلورانس از موازنه انرژی جنبشی پرتابه برخورد کننده به هدف با انرژی جذب شده در لایه پشتیبان، مقدار سرعت حد بالستیک به دست می‌آید. در سال ۱۹۹۰ مدل تحلیلی دیگری توسط وود^۵ وارد معرفی گردید [۵] که در این مدل فرآیند ضربه پرتابه در هدف سرامیک-آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل ویژگی‌های اصلی شکست زره سرامیک-کامپوزیت (در این مدل بحث زاویه مخروط سرامیکی، تغییر شکل صفحات نازک و فرسایش^۶ پرتابه) با اثر توده شدن جرم^۷ ترکیب شده و یک مدل ساده را تولید نموده که محاسبه اهداف سرامیک-فلز با لایه پشتیبان نازک و ضخیم را امکان پذیر نمود. نتایج این مدل تحلیلی برای کالیبرهای کوچک معتبر می‌باشد و برای پرتابه با کالیبر متوسط نتایج آزمایشگاهی با مدل تحلیلی تطابق نداشته و مدل برای این حالت معتبر نمی‌باشد. در سال ۱۹۹۱ دن ریجر^۸ مدلی ارائه داد که در آن به بررسی فاز فرسایش و قارچی شدن پرتابه و نیز مدل‌های مختلف تغییر شکل فلز لایه پشتیبان پرداخته و همچنین معادلاتی برای رفتار سرامیک خرد شده ارائه داده است [۶]. در سال ۱۹۹۸ مدل تحلیلی دیگری توسط زئیرا و سنچز - گالوز^۹ ارائه گردید [۷]. اصل این مدل بر پایه معادله نفوذ درون سرامیک تیت و

2- Wilkins

3- Lee

4- Florence

5- Woodward

6- Erosion

7- Lumping Of Masses

8- Den Reijer

9- Zaera and Sanches-Galvez

1- Smoothed Particle Hydrodynamic

$$a = a_p + 2h_2 \quad (1)$$

اگر رابطه (۱) برحسب زاویه مخروط سرامیکی نوشته شود، به صورت رابطه (۲) تبدیل می شود:

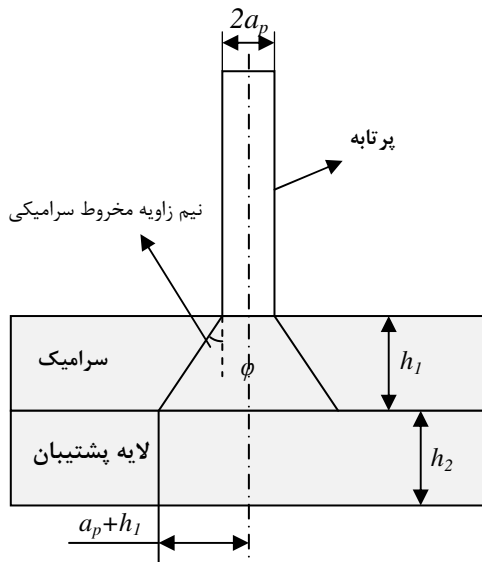
$$a = a_p + h_2 \tan \varphi \quad (2)$$

که در آن، φ نیم زاویه مخروط سرامیکی می باشد. رابطه (۲) در رابطه (۳) که تابع جرمی متشکل از پرتابه و هدف می باشد، تأثیر بسزایی خواهد داشت. همچنین رابطه (۳) اهمیت بالایی در پیش بینی سرعت حد بالستیک که در رابطه (۴) آمده، خواهد داشت و نشان دهنده تأثیر نیم زاویه در پیش بینی سرعت حد بالستیک است.

$$f(a) = \frac{M_p}{[M_p + (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) \pi a^2] \pi a^2} \quad (3)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \sigma_2 h_2}{.91 M_p f(a)}} \quad (4)$$

که در آن، V_p سرعت حد بالستیک، ε_2 کرنش شکست لایه پشتیبان، σ_2 مقاومت نهایی کششی لایه پشتیبان (UTS)، ρ_2 چگالی لایه پشتیبان، h_2 ضخامت لایه پشتیبان، ρ_1 چگالی سرامیک، h_1 ضخامت سرامیک و M_p جرم پرتابه می باشد.



شکل (۱): شماتیک برخورد پرتابه با هدف و تشکیل مخروط سرامیکی.

۲-۲- مدل تحلیلی زئیرا - سنچز گالوز

در این مدل، نیم زاویه مخروط سرامیکی ۶۵ درجه فرض شده است. شکل نیم زاویه مخروط سرامیکی و رابطه مومنتم خطی ترک مخروطی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدل تحلیلی گشتاور خطی ترک مخروطی از رابطه (۵) به دست می آید.

الکسیوکی^۱ بوده، ضمن اینکه مدل لایه فلزی از مدل وودوارد و دن ریجر اقتباس شده است. در این مدل مقادیر سرعت شعاعی، جرم شعاعی و سرعت حد بالستیک برای پرتابه های با کالیبر متوسط و کوچک با مقادیر آزمایشگاهی تطابق دارد. در این مدل، قارچی شدن نوک پرتابه در نظر گرفته نشده و فقط فرسایش در حین نفوذ در محاسبات در نظر گرفته شده است. در سال ۲۰۱۰ مدلی دیگر توسط فعلی ارائه گردید [۸] که اساس آن بر پایه مدل زئیرا و سنچز - گالوز می باشد، که در آن مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه های تغییر شکل پذیر درون اهداف سرامیک - فلز توسعه داده شده است. در این مدل در شرح تغییر شکل نوک پرتابه، معادله مومنتم محوری در امتداد محور مرکزی پرتابه و هدف انتگرال گیری شده است. برای مدل سازی رفتاری مخروط سرامیکی از معادله گشتاور خطی استفاده و برای مدل سازی تغییر شکل لایه فلزی رفتار کارسختی مواد صلب در نظر گرفته شده است. همچنین از تعادل معادله انرژی نیز استفاده شده و با تقسیم فرآیند نفوذ به چند مرحله، در هر مرحله معادلات مربوط استخراج شده است.

در مدل های تجربی با استفاده از داده های آزمایشی معادله های جبری حاکم بر آنها استخراج و سپس پارامترهای مدنظر پیش بینی می شوند. مدل های تجربی متعددی ارائه شده که از آن میان می توان به آزمایش های بلس^۲ و همکارانش [۹]، میسلز^۳ و همکارانش [۱۰] در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی اشاره نمود.

۲- تأثیرات نیم زاویه مخروط سرامیکی در مدل های تحلیلی

زاویه مخروط سرامیکی می تواند تأثیر بسزایی در جواب نهایی مدل های تحلیلی نفوذ در اهداف سرامیک - فلز داشته باشد. در ادامه تأثیرات زاویه مخروط سرامیکی بر چند مدل تحلیلی مهم، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- مدل تحلیلی فلورانس

این مدل که اولین مدل تحلیلی ارائه شده در اهداف سرامیک - فلز می باشد، زاویه مخروط سرامیکی ثابت و برابر با ۶۳ درجه فرض شده است. در این مدل، زاویه تأثیر خود را در جرم مؤثر نشان می دهد. با توجه به شکل ۱ که بیانگر برخورد پرتابه با هدف می باشد، رابطه زیر را می توان نوشت:

10-Tate and Alekseevskii

2- Bless

3- Mayselless

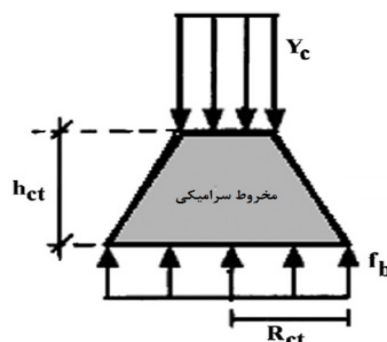
$$\emptyset = \left(\frac{U_p - 220}{780} \right) \frac{34\pi}{180} + \frac{34\pi}{180} \quad (۹)$$

۲-۴- مدل تحلیلی فعلی

در این مدل، نیم‌زاویه مخروط سرامیکی بر اساس آزمایش‌های ویلسون-هترینگتون^[۱۲] تعیین شده است. بر اساس این آزمایش‌ها نیم‌زاویه مخروط سرامیکی بین مقادیر ۳۰-۲۰ درجه تغییر می‌کند. وقتی سرعت کمتر از ۳۵۰ m/s باشد نیم‌زاویه برابر با ۳۰ درجه و زمانی که سرعت برخورد بیشتر از ۱۰۰۰ m/s باشد نیم‌زاویه مخروط برابر با ۲۰ درجه می‌باشد. روابط مورد استفاده در این مدل همان روابط مدل زئیرا بوده که در روابط (۸-۵) به آنها اشاره گردید.

به‌نظر می‌رسد علت اختلاف زاویه مخروط سرامیکی در این مدل‌ها، تفاوت در نوع پرتابه و هدف می‌باشد. به‌عبارت دیگر نوع دماغه پرتابه، پرتابه بلند و کوتاه، نوع هدف از منظر ضخامت (هدف نازک، متوسط و نیمه بی‌نهایت) پارامترهای مهم در اختلاف در زاویه مخروط سرامیکی در این مدل‌ها باشد. به‌عنوان مثال، همان‌طور که اشاره گردید، رابطه نیم‌زاویه فلوز برای سرامیک با ضخامت متوسط و لایه پشتیبان نیمه بی‌نهایت و پرتابه سرتخت می‌باشد، در حالی که در موارد دیگر که این نیم‌زاویه را پیش‌بینی نموده‌اند، ضخامت سرامیک و لایه پشتیبان و هندسه پرتابه متفاوت بوده است. رابطه ارائه شده توسط فلوز با افزایش سرعت برخورد، نیم‌زاویه مخروطی افزایش یافته تا اینکه در مقدار ۶۸ درجه ثابت گردد، اما در رابطه ارائه شده توسط ویلسون-هترینگتون با افزایش سرعت برخورد، نیم‌زاویه مخروطی کاهش یافته تا اینکه در مقدار ۲۰ درجه ثابت گردد.

نیم‌زاویه مخروطی به پارامترهای مختلفی از قبیل ضخامت سرامیک، ضخامت لایه پشتیبان، قطر پرتابه، دماغه پرتابه، طول پرتابه و سرعت پرتابه بستگی خواهد داشت. ولی از آنجایی که بیشترین تحقیقات صورت گرفته دال بر این مطلب می‌باشد که در پارامترهای یاد شده سرعت برخورد بیشترین اهمیت را داراست، بنابراین در این مقاله بررسی و نقش سرعت برخورد پرتابه بر نیم‌زاویه مخروطی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به همین منظور یک هدف ثابت و پرتابه سرتختی که در واقعیت کاربرد بیشتری دارد برای انجام این آزمایشات در نظر گرفته شد.



شکل (۲): مخروط سرامیکی.

$$\frac{dp_c}{dt} = Y_c \pi \frac{D_{eq}^2}{4} - f_b \pi R_{ct}^2 \quad (۵)$$

که در آن، f_b فشار روی سطح مشترک پرتابه - هدف، R_{ct} شعاع ترک مخروطی و p_c گشتاور خطی آن می‌باشد. R_{ct} از رابطه (۶) به‌دست می‌آید:

$$R_{ct} = \frac{D_{eq}}{2} + h_{ct} \cdot \tan \alpha \quad (۶)$$

که در آن، h_{ct} ضخامت واقعی سرامیک جداکننده سر پرتابه از صفحه فلزی است. مومنتم خطی مخروط با در نظر گرفتن توزیع سرعت V روی سطح مشترک پرتابه - سرامیک و W در سطح مشترک ماده فلزی پشتی - سرامیک از رابطه (۷) تعیین می‌شود:

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{\partial P_c}{\partial h_{ct}} \frac{dh_{ct}}{dt} + \frac{\partial P_c}{\partial R_{ct}} \frac{dR_{ct}}{dt} + \frac{\partial P_c}{\partial u} \frac{du}{dt} + \frac{\partial P_c}{\partial w} \frac{dw}{dt} \quad (۷)$$

$$P_c = \pi \rho_c h_{ct} \left[U \left(\frac{D_{eq}^2}{16} + \frac{R_{ct}^2}{12} + \frac{D_{eq} R_{ct}}{12} \right) + W \left(\frac{D_{eq}^2}{48} + \frac{R_{ct}^2}{4} + \frac{D_{eq} R_{ct}}{12} \right) \right] \quad (۸)$$

با توجه به روابط ذکر شده، ارائه صحیح از نیم‌زاویه مخروط سرامیکی تأثیر بسزایی در حل مسئله (پاسخ فلز) و سرانجام در جواب نهایی هدف فلز - سرامیک خواهد داشت.

۲-۳- مدل

در مدل تحلیلی فلوز^[۱۱] یک رابطه تحلیلی برای نیم‌زاویه مخروط سرامیکی برای پرتابه‌های میله بلند استوانه‌ای (سرتخت) در اهداف با لایه پشتیبان نیمه بی‌نهایت ارائه شده است. رابطه (۹) بیان‌کننده رابطه نیم‌زاویه مخروط سرامیکی برحسب سرعت برخورد در بازه سرعت ۱۰۰۰-۲۲۰ m/s می‌باشد. در این رابطه نیم‌زاویه از ۳۴ درجه (سرعت ۲۲۰ m/s) تا ۶۸ درجه (سرعت ۱۰۰۰ m/s) تغییر می‌کند. در سرعت‌های بالاتر از ۱۰۰۰ m/s فرض بر این است که زاویه برابر با ۶۸ درجه خواهد شد. در این رابطه U_p سرعت برخورد می‌باشد:

ماشین کاری روی اهداف صورت گرفته است. شکل ۳- الف اتصال اولیه سرامیک با فلز و شکل ۳- ب، هدف نهایی و آماده آزمایش را نشان می‌دهد.

۳- مراحل ساخت و مشخصات فیزیکی هدف و پرتابه
در این کار تحقیقی از فلز آلومینیوم T6-۶۰۶۱ به عنوان لایه پشتیبان و سرامیک از جنس آلومینا ۹۹٪ استفاده شده است.

جدول (۲): خواص مکانیکی T6-۶۰۶۱.

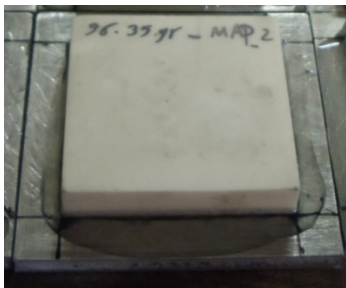
درصد ازدیاد طول	استحکام کششی MPa	سختی HB	مدول یانگ GPa	چگالی kg/m ³	تمپر
نمونه ۱۶mm	۳۳۱	۱۰۱	۶۸/۳	۲۷۰۰	T6

۳-۱- خواص مکانیکی هدف

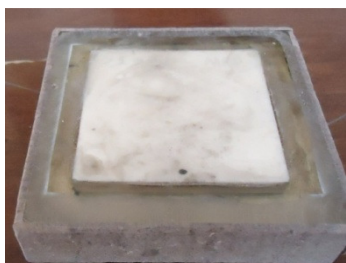
سرامیک آلومینا با توجه به خواص بسیار بالای بالستیکی و دسترسی آسان و فراوانی مورد استفاده قرار گرفته است. خواص سرامیک آلومینا مورد استفاده در آزمایش‌های جدول ۱ ارائه شده است. ابعاد سرامیک مورد استفاده در این آزمایش ۵۰×۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر می‌باشد.

جدول (۱): خواص سرامیک مورد استفاده در آزمایش.

سرامیک آلومینا		
پارامتر	واحد	مقدار
خلوص	---	٪۹۹
دانه بندی	μm	۱۰
چگالی	kg/m ³	۳۸۰۰-۳۸۵۰
سختی	HRa	۸۳
استحکام خمشی ۳ نقطه‌ای	MPa	۳۵۰



(الف)



(ب)

شکل (۳): الف) اتصال اولیه سرامیک با فلز و ب) هدف نهایی و آماده آزمون.

از فلز آلومینیوم T6-۶۰۶۱ با توجه به خواص: ۱- چگالی پایین، ۲- سختی مناسب، ۳- خاصیت جوشکاری خوب و ۴- خواص انتقال امواج به عنوان لایه پشتیبان سرامیک استفاده شده است. باید اشاره نمود این آلیاژ یکی کاربردی‌ترین آلیاژهای مورد استفاده در صنایع نظامی و هوایی می‌باشد. مشخصات مکانیکی فلز آلومینیوم T6-۶۰۶۱ با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته در جدول ۲ نشان داده شده است. ابعاد آلومینیوم مورد استفاده در آزمایش ۷۰×۷۰ میلی‌متر و به ضخامت ۶ میلی‌متر می‌باشد. در ساخت اهداف سرامیک- فلز سه مرحله صورت گرفته است که عبارتند از: ۱- اتصال اولیه سرامیک با فلز، ۲- قالب‌گیری مناسب توسط رزین و ۳- ماشینکاری هدف برای همگن نمودن ابعاد آن. هدف از قالب‌گیری اهداف به وسیله رزین جلوگیری از متلاشی شدن سرامیک خرد شده پس از اصابت پرتابه است. برای قالب‌گیری و پرسازی فضای بین صفحه بالای آلومینیوم تا صفحه بالای سرامیک از رزین SR1700 و هاردنر SD2705 استفاده شده است. برای آنکه نیروی تکیه‌گاهی به صورت عمودی بر هدف اعمال گردد، پس از قالب‌گیری مناسب توسط رزین، عملیات

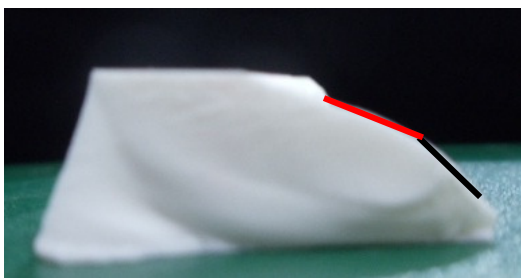
۳-۲- خواص مکانیکی پرتابه

پرتابه‌های ضد زره معمولاً از کاربید تنگستن و یا فولادهای با سختی بالا ساخته می‌شوند. جنس پرتابه به کارگیری شده در آزمایش‌های فولاد ۱/۲۵۱۰ بوده، که از دلایل استفاده از این آلیاژ می‌توان به قابلیت سخت کاری و تنش تسلیم بالای آن اشاره نمود. خواص مکانیکی این فولاد پس از سخت کاری در جدول ۳ آورده

نمونه‌ها در داخل قالب نگهدارنده دستگاه تفنگ گازی با اعمال گشتاور یکسان در پیچ‌ها، شرایط مرزی کاملاً گیردار در لبه‌های هدف ایجاد می‌نماید.

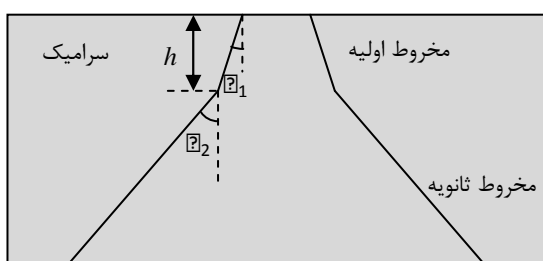
۴- بحث و نتایج آزمایش‌ها

انجام آزمایش‌ها، مشاهدات و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، حاکی از این مطلب است که یک مخروط سرامیکی دو مرحله‌ای ایجاد شده است که شاید علت ایجاد این مخروط دو مرحله‌ای، نوع دماغه پرتابه باشد. شکل ۶ یک قطعه سرامیک خرده شده از یک هدف پس از اصابت گلوله را نشان می‌دهد. در این مخروط دومرحله‌ای به وضوح دیده می‌شود که زاویه مخروط اولیه (θ_1) متغیر بوده ولی زاویه مخروط ثانویه (θ_2) را تقریباً می‌توان ثابت در نظر گرفت.



شکل (۶): یک قطعه سرامیک خرده شده از هدف.

در شکل ۷ مخروط سرامیکی دو مرحله‌ای به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۷): شماتیک مخروط سرامیک دومرحله‌ای از اصابت پرتابه سرمخروطی.

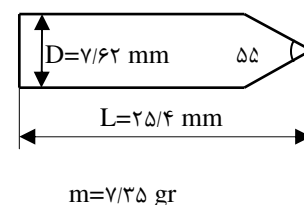
۴-۱- روند اندازه‌گیری زاویه مخروط سرامیکی

برای اندازه‌گیری زاویه‌های θ_1 و θ_2 و ارتفاع h برای هر هدف، ابتدا سرامیک‌های جانبی که تقریباً سالم مانده‌اند، جداسازی شده و پس از شماره‌گذاری هر قطعه که در تصویر سمت راست شکل ۸- ب نشان داده شده است، توسط تجهیزات خاص زوایای θ_1 و θ_2 و ارتفاع h اندازه‌گیری می‌شود.

شده است. همچنین یک پرتابه با سابوت^۱ همراه با مشخصات هندسی در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول (۳): خواص فولاد آلیاژی پرتابه مورد استفاده در آزمایش.

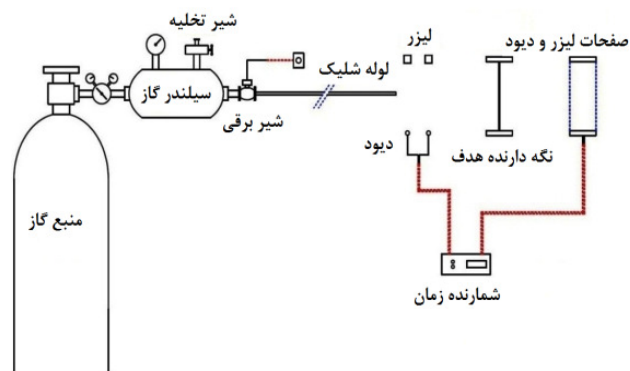
فولاد ۱/۲۵۱۰		
پارامتر	واحد	مقدار
چگالی	$\frac{kg}{m^3}$	۷۸۰۰
سختی	HRC	۶۰-۶۲
استحکام خمشی ۳ نقطه‌ای	MPa	۳۵۰
مدول یانگ	GPa	۲۱۴
تنش تسلیم	MPa	۵۲۰



شکل (۴): ابعاد هندسی پرتابه و یک نمونه پرتابه همراه با سابوت مورد استفاده در آزمایش.

۳-۳- دستگاه شلیک پرتابه

در آزمون‌های انجام شده، پس از شلیک پرتابه توسط دستگاه تفنگ گازی^۲ (شکل ۵)، سرعت پرتابه قبل از برخورد توسط سامانه لیزری اندازه‌گیری شده است.



شکل (۵): طرح شماتیک تفنگ گازی.

1- Sabot
2- Gas Gun

در آزمایش‌های با سرعت بالای پرتابه، قطعه سرامیکی به قطعات بسیار ریز تبدیل شده و پودر می‌شود که در چنین حالتی اندازه‌گیری زوایا را غیرممکن می‌نماید. با میانگین گرفتن از زوایای θ_1 و θ_2 و ارتفاع h ، یک مقدار مشخص برای هر سرعت برخورد به دست آمده است.

جدول ۵ نیز مقادیر میانگین زوایای θ_1 و θ_2 و ارتفاع h را برای برخی از آزمایش‌ها نشان می‌دهد.

جدول (۵): میانگین مقادیر θ_1 ، θ_2 و h برای برخی از آزمایش‌ها.

شماره آزمایش	V_I (m/s)	θ_1 (درجه)	θ_2 (درجه)	h (mm)
۱	۲۶۷	۶۰/۶	۷۲	۵/۳
۲	۲۸۰	۶۲/۲	۷۲/۲	۶/۱۶
۳	۳۸۳	۶۴/۶۳	-	۵/۶۲
۴	۳۹۱	۶۲/۳	۷۳/۴	۵/۱۲
۵	۵۶۶	۴۴	۷۲/۷	۴/۲۷

با توجه به مقادیر به دست آمده می‌توان θ_2 را ثابت و برابر با مقدار $۷۲/۵$ درجه در نظر گرفت و از روش برازش منحنی، نیم‌زاویه مخروط سرامیکی را برای θ_1 به دست آورد. از سه روش برازش منحنی خطی کمترین مربعات، سهمی کمترین مربعات و نمایی رابطه نیم‌زاویه مخروط سرامیکی θ_1 به دست آمده که به ترتیب در روابط (۱۰-۱۲) آمده است.

$$\theta_1 = -0.0564V_I + 80.0320, \quad (10)$$

$$\theta_1 = -0.0004V_I^2 + 0.306V_I + 10.307, \quad (11)$$

$$\theta_1 = 87.56e^{-0.0011V_I}. \quad (12)$$

در شکل ۹ سه رابطه خطی، سهمی و نمایی رسم شده است. همان‌طور که از شکل پیداست روابط خطی و نمایی تا محدوده سرعت ۷۵۰ m/s همپوشانی داشته و مقادیر یکسانی برای نیم‌زاویه مخروط سرامیکی ارائه می‌دهند و در سرعت‌های بالاتر از ۷۵۰ m/s با افزایش سرعت، اختلاف در پیش‌بینی نیم‌زاویه مخروط سرامیکی رو به افزایش خواهد گذاشت. برازش سهمی با توجه به اینکه در سرعت‌های بالاتر از ۷۵۰ m/s نیم‌زاویه مخروطی را منفی پیش‌بینی می‌نماید، برازش مناسبی برای نیم‌زاویه مخروط سرامیکی نمی‌باشد.



(الف)



(ب)

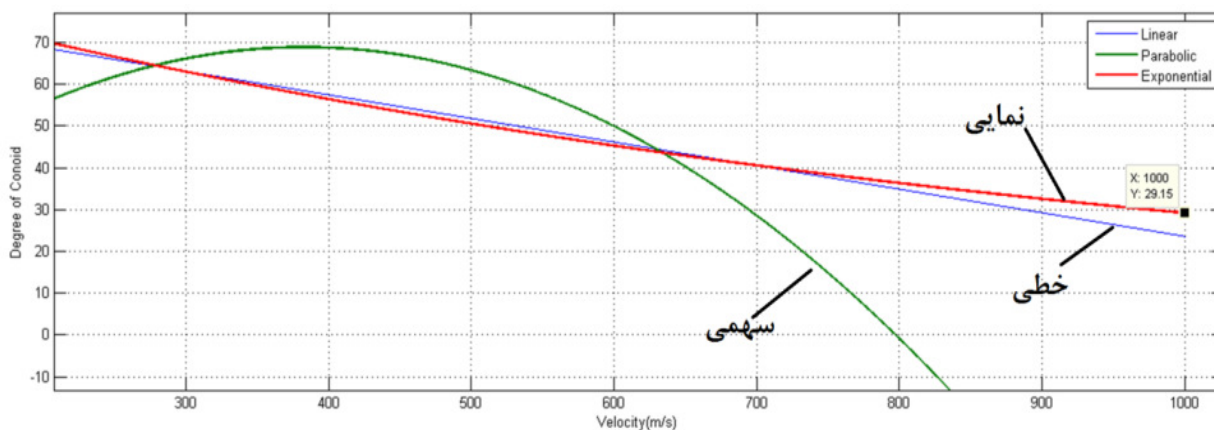
شکل (۸): تصویر a: قبل از جداسازی رزین و تصویر b: بعد از جداسازی رزین و شمارگذاری برای آزمایش با سرعت برخورد $۲۷۹/۷۲۰ \text{ m/s}$.

جدول ۴ نمونه‌ای از اندازه‌گیری‌های انجام شده برای یک آزمایش را نشان می‌دهد که در آن، سرعت برخورد پرتابه $۲۷۹/۷۲۰ \text{ m/s}$ است البته باید اشاره نمود با توجه به شکست غیرمتمقارن سرامیک و فرآیند پیچیده رشد ترک، در بعضی از قطعات خرد شده سرامیک اندازه‌گیری زوایا امکان‌پذیر نبوده است.

جدول (۴): مقادیر θ_1 ، θ_2 و h برای آزمایش

با سرعت برخورد $۲۷۹/۷۲۰ \text{ m/s}$.

شماره اندازه‌گیری	شماره قطعه	θ_1	θ_2	h (mm)
۱	۱	۶۶	-	-
۲	۲	۵۶/۵	۷۵	۶/۳۷
۳	۳	۶۵	۷۲	۵/۰۲
۴	۸	۶۵	۷۴	۵/۷۵
۵	۹	۶۳/۵	۷۴	۷/۱۵
۶	۱۰	۵۷	۶۹	-



شکل (۹): برازش خطی، سهمی و نمایی.

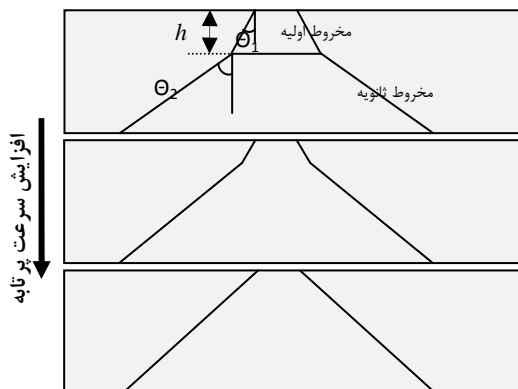
سرعت برخورد کاهش یافته تا اینکه در چند برابر سرعت حد بالستیک به صفر میل نماید (این فرض با توجه به انرژی جنبشی بسیار بالای پرتابه در سرعت‌های چندین برابر سرعت حد بالستیک و پیچیدگی رفتار رشد ترک و شکست در سرامیک، توسط نگارنده در نظر گرفته شده است). حال با توجه به فرضیات مطرح گردیده، برای انتخاب بهترین رابطه برای پیش بینی نیم‌زاویه مخروطی باید یک فرض به عنوان مبنا انتخاب گردد. اگر فرض (۱) مبنای انتخاب بهترین نیم‌زاویه باشد، رابطه‌ی خطی بهترین رابطه می‌باشد. در این رابطه نیم‌زاویه در سرعت 200 m/s برابر با $68/8$ درجه و در سرعت 1000 m/s برابر $23/6$ درجه می‌باشد حال اگر مبنا فرض (۲) باشد، بهترین رابطه پیش‌بینی کننده نیم‌زاویه مخروط سرامیکی، رابطه نمایی می‌باشد. در این رابطه نیم‌زاویه در سرعت 200 m/s برابر با $70/3$ درجه و با افزایش سرعت برخورد پرتابه به چند برابر سرعت حد بالستیک، به صفر درجه میل می‌نماید.

۳-۴- بهینه‌سازی مدل فلورانس با استفاده از نیم‌زاویه مخروط سرامیکی تجربی

در مدل فلورانس از موازنه انرژی جنبشی پرتابه برخورد کننده به هدف با انرژی جذب شده در لایه پشتیبان، مقدار سرعت حد بالستیک به دست می‌آید. رابطه حد بالستیکی که فلورانس ارائه داد، در رابطه (۴) آورده شده است این رابطه که برای پرتابه‌های سرتخت و اهداف متوسط است، وابسته به رابطه جرم مؤثر بوده که رابطه جرم مؤثر خود نیز، تابعی از نیم‌زاویه مخروطی می‌باشد. همان‌طور که بیان گردید، در سرعت‌های پایین، یک ترک مخروط دومرحله‌ای ایجاد می‌گردد و با افزایش سرعت، این مخروط به یک مخروط یک‌پارچه تبدیل می‌شود. برای

۲-۴- بحث در مورد نیم‌زاویه های مخروطی به دست آمده از برازش منحنی

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در سرعت‌های پایین‌تر از سرعت حد بالستیک برای پرتابه سر مخروطی، ترک مخروطی دو مرحله‌ای ایجاد می‌گردد و با افزایش سرعت این ترک دو مرحله‌ای تبدیل به یک ترک یک‌پارچه مخروطی می‌شود. شکل ۱۰ بیانگر این تغییرات می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از این آزمایش، در ترک مخروطی دو مرحله‌ای، θ_1 متغیر و θ_2 تقریباً ثابت و برابر $72/5$ درجه می‌باشد.



شکل (۱۰): تغییرات زاویه مخروط سرامیکی در اثر افزایش سرعت برخورد پرتابه.

در بررسی تغییرات نیم‌زاویه مخروط سرامیکی می‌توان ۲ فرض اولیه نمود که عبارتند از: ۱- نیم‌زاویه برای سرعت‌های بالاتر از 1000 m/s ثابت و برابر با مقدار به دست آمده در سرعت 1000 m/s است (این فرض توسط اکثر محققین مورد استفاده قرار گرفته است و ۲- برای سرعت‌های حد بالستیک این نیم‌زاویه برابر با صفر می‌شود یعنی از یک مقدار خاص، نیم‌زاویه با افزایش

بهینه‌سازی مدل تحلیلی فلورانس با توجه به اینکه این رابطه سرعت حد بالستیک را پیش‌بینی می‌کند و مقدار سرعت برخورد پرتابه با لا می‌باشد و همچنین از نیم‌زاویه مخروط سرامیکی برای تعیین مقدار جرم مؤثر استفاده می‌گردد و با توجه به نتایج تجربی به دست آمده، مقدار نیم‌زاویه مخروط سرامیکی $72/5$ در رابطه (۲) و از رابطه خطی نیم زاویه مخروطی، برای بهینه نمودن این مدل تحلیلی برای پرتابه‌های سرمخروطی مورد استفاده قرار گرفته است. حال برای صحنه‌گذاری مدل بهینه‌سازی شده فلورانس، از نتایج تجربی ویلکینز [۱۳] که در آن ضخامت هدف و هندسه پرتابه نزدیک به نتایج تجربی انجام شده در این تحقیق می‌باشد، استفاده گردیده است.

هدف متشکل از سرامیک در جلو و آلومینیوم به‌عنوان لایه پشتیبان در پشت سرامیک می‌باشد. در این آزمایش، سرامیک از جنس B_4C با چگالی $2480 \frac{kg}{m^3}$ و مقاومت فشاری $13/37 GPa$ می‌باشد. جنس لایه پشتیبان از آلومینیوم 6061-T6 با چگالی 2740 ، مقاومت کششی نهایی $310 MPa$ ، مقاومت فشاری دینامیکی $600 MPa$ و کرنش شکست $0/15$ است.

۴-۴- مقایسه نتایج مدل تحلیلی بهینه‌شده با دیگر مدل‌های تحلیلی

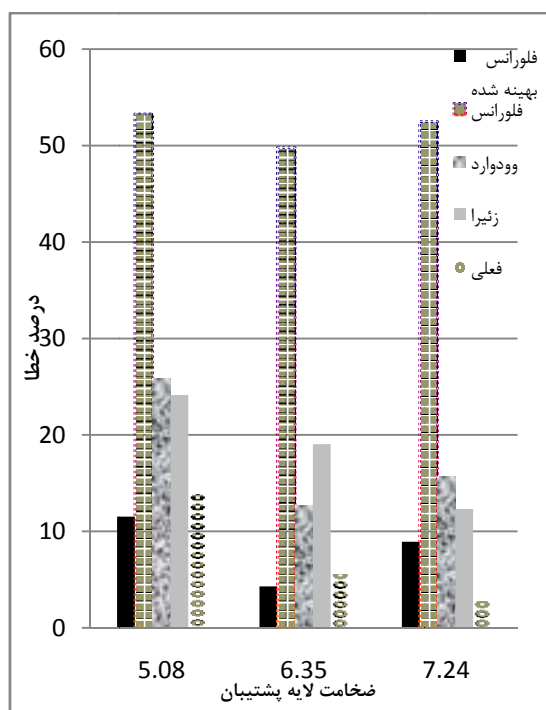
از مدل‌های تحلیلی مهم که پیش‌بینی مناسبی از فرآیندهای نفوذ (به‌ویژه سرعت حد بالستیک) در اهداف نازک و متوسط سرامیک - فلز دارند، می‌توان به مدل‌های وودوارد، زئیرا و فعلی اشاره نمود. در جدول ۶ نتایج حاصل از مدل‌های تحلیلی و مدل بهینه شده در پیش‌بینی سرعت حد بالستیک مورد مقایسه قرار گرفته است.

مشخصات پرتابه و هدف آزمایش ویلکینز: در این آزمایش از پرتابه فولادی ۱ به‌سختی ۵۶-۵۴ راکول سی با زاویه مخروطی ۵۵ درجه به طول یک اینچ ($25/4$ میلی‌متر) و به قطر $0/3$ اینچ ($7/62$ میلی‌متر) و به وزن $8/13$ گرم و مقاومت دینامیکی

جدول (۶): سرعت حد بالستیک برای سرامیک (B_4C) و لایه پشتیبان (T6-6061) در ضخامت‌های مختلف.

ضخامت لایه پشتیبان (6061-T6) (mm)	ضخامت سرامیک (B_4C) (mm)	سرعت حد بالستیک (m/s)					
		فعلی	زئیرا	وودوارد	تجربی [۱۲]	فلورانس	فلورانس بهینه شده
۵,۰۸	۵,۵	۶۶۰	۴۴۰	۴۳۰	۵۸۰	۲۷۰,۹۱	۵۱۳,۱۱
	۶,۳	۶۸۰	۵۰۰	۵۰۰	۶۴۰	۳۳۱,۷۴	۶۵۰,۸۸
	۷	۷۰۰	۵۵۰	۵۸۰	---	۳۹۲,۱۸	۷۸۹,۲۲
۶,۳۵	۵,۵	۶۶۵	۵۱۰	۵۵۰	۶۳۰	۳۱۶	۶۰۲,۹۲
	۶,۳	۷۱۰	۵۵۰	۶۲۰	---	۳۸۷,۶۳	۷۶۳,۹۲
	۷	۷۸۰	۶۱۰	۷۴۰	۸۳۰	۴۵۷,۴	۹۲۵,۰۷
۷,۲۴	۵,۵	۷۵۰	۶۴۰	۶۱۵	۷۳۰	۳۴۶,۸۸	۶۶۴,۸۰
	۶,۳	۷۶۰	۶۷۵	۷۰۰	۸۳۰	۴۲۴,۹۲	۸۴۱,۷۴
	۷	۷۷۰	۷۲۰	۸۳۰	---	۵۰۲,۰۹	۱۰۱۸,۵

نتایج به دست آمده از مدل بهینه شده دارای خطای کمتر از ۱۲٪ بوده که نسبت به دیگر مدل های تحلیلی از دقت مناسبی برخوردار است. در بیشتر حالت های آمده در جدول ۶، خطای مدل بهینه شده کمتر از سایر مدل ها می باشد که این خود مؤید این موضوع است که رابطه تجربی به دست آمده از دقت بالایی برخوردار می باشد. در شکل ۱۳ درصد خطای مدل های تحلیلی وودوارد، زئیرا، فعلی و فلورانس بهینه شده برای ضخامت ۵٫۵ mm نشان داده شده است.



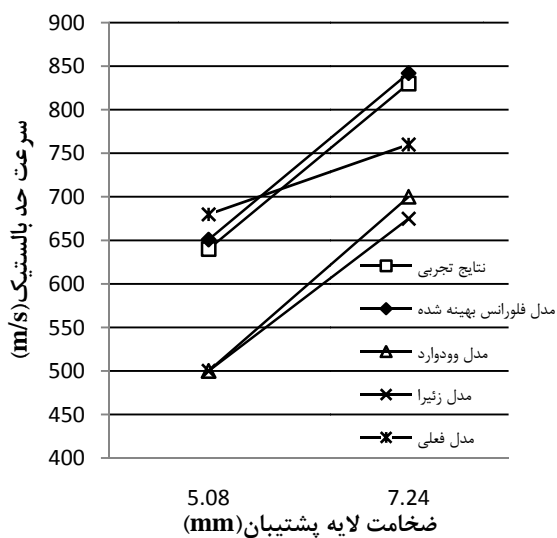
شکل (۱۳): درصد خطای مدل های تحلیلی برای ضخامت ۵٫۵ mm سرامیک.

۵- نتیجه گیری

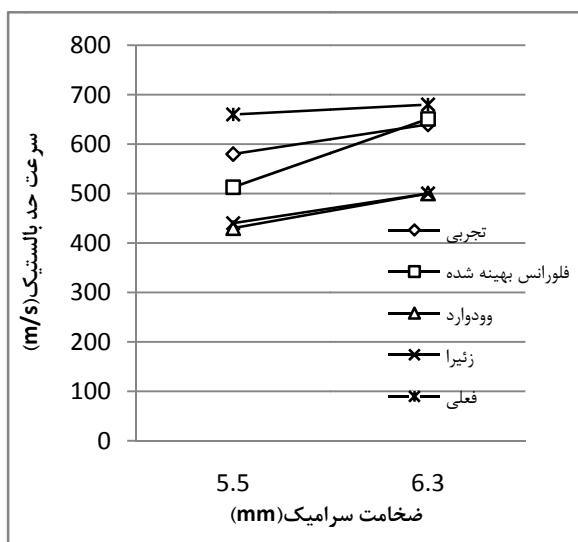
در مقاله حاضر به بررسی زاویه مخروط ناقص سرامیکی بر حسب سرعت برخورد پرتابه سرمخروطی در اهداف سرامیک-فلز پرداخته شده و یک رابطه تجربی برای زاویه مخروط سرامیک بر حسب سرعت برخورد پرتابه برای اهداف متوسط سرامیک-فلز ارائه شده است. همچنین آزمایش های انجام شده، نشان دادند که یک مخروط دو مرحله ای صورت گرفته که مخروط اولیه دارای زاویه متغیر و مخروط ثانویه دارای زاویه ثابت در حدود ۷۳-۷۲ درجه می باشد.

در شکل ۱۱ سرعت حد بالستیک مدل های تحلیلی وودوارد، زئیرا، فعلی و فلورانس بهینه شده برای ضخامت ۶٫۳ mm سرامیک مورد قیاس قرار گرفته است.

در شکل ۱۲ سرعت حد بالستیک مدل های تحلیلی وودوارد، زئیرا، فعلی و فلورانس بهینه شده برای ضخامت ۵٫۰۸ mm لایه پشتیبان مقایسه شده است



شکل (۱۱): مقایسه سرعت حد بالستیک مدل های تحلیلی برای ضخامت ۶٫۳ mm سرامیک.



شکل (۱۲): مقایسه سرعت حد بالستیک مدل های تحلیلی برای ضخامت ۶٫۳ mm لایه پشتیبان.

3. Lee, M. and Yoo, Y.H. "Analysis of Ceramic/Metal Armoursystems", Int. J. Impact Eng, Vol. 25, pp. 819-829, 2001.
4. Florence, A.L. "Interaction of Projectiles and Composite Armor, Part II", Standfordresearch Institute, Menlo Park, California, AMMRC-CR-69-15, 1969.
5. Woodward, R.L. "A Simple One-Dimensional Approach to Modeling Ceramic Compositarmour Defeat", Int. J. Impactengng, Vol. 9, pp. 455-474, 1990.
6. Den Reijer, P.C. "Impact on Ceramic Faced Armours", Phd Thesis, Delft University Oftechnology.
7. Zaera, R. and Sanches-Galvez, V. "Analytical Modeling of Normal and Oblique Ballisticimpact on Ceramic/Metal Light Weight Armours", Int. J. Impact Engng, Vol. 21, No. 3, pp. 133-148, 1998.
8. Feli, S., Aalamiaaleagha, M.E., and Ahmadi, Z. "A New Analytical Model of Normal penetration of Projectiles into the Light-Weight Ceramic-Metal Target", Int. J. Impact Engng, Vol. 37, pp. 561-567, 2010.
9. Bless, S. J., Rozenberg, Z., and Yoon B. "Hypervelocity penetration of Ceramics", Int. J. Impact Eng, Vol. 5, pp. 165-171, 1987.
10. Mayselless, M., Goldsmith, W., Virosterk, S.P., and Finnegan. A. "Impact on Ceramic Targets", J. Appl. Mech, Vol. 54, pp. 373-378, 1987.
11. Fellows, N.A. and Andbartan, P.C. "Development of Impact Model for Ceramic Faced Semiin finitearmour", Int. J. Impact Engng, Vol. 22, pp. 793-811, 1998.
12. Wilson, D. and Hetherington, J.G. "Analysis of Ballistic Impact on Ceramic Faced Armourusing High Speed Photography In: Proc. Lightweight Armour System Symp", Cranfield: Royal Military College of Sci., pp. 123-130, 1995.
13. Wilkins, M.L. Cline, C.F., and Honodel, CA. "Forth Progress Report of the Light Armorprogram", Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory. Report No. UCRL-50694, 1969.

زاویه مخروط اولیه به صورت دو تابع خطی و نمایی که در محدوده سرعت ۷۵۰-۲۵۰ m/s دارای هم پوشانی بالایی بوده، بیان شده است. روابط به دست آمده با توجه به دو فرض: ۱- زاویه مخروط در سرعت های بالاتر از ۱۰۰۰ m/s ثابت است و ۲- زاویه مخروط در سرعت های چند برابر سرعت حد بالستیک به صفر میل می کند، مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده است. با مبنا قرار دادن فرض ۱، بهترین گزینه برای پیش بینی زاویه مخروط، رابطه خطی بوده و در صورتی که فرض ۲ مبنا قرار گیرد، رابطه نمایی بهترین گزینه برای پیش بینی زاویه مخروط خواهد بود.

با به کارگیری رابطه تجربی زاویه مخروطی در مدل تحلیلی فلورانس که سرعت حد باستیک را پیش بینی می نماید، این مدل بهینه گردید به طوری که با مبنا قرار دادن نتایج ویلکینز، نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی بهینه شده دارای خطای کمتر از ۱۲٪ گردید. نتایج به دست آمده دال بر اهمیت ارائه رابطه دقیق زاویه مخروطی و تأثیر آن در جواب نهایی دقیق در مدل های تحلیلی می باشد. مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش ها با نتایج تحلیلی سایر نویسندگان نشان داد که رابطه تجربی به دست آمده از اعتبار مناسب و بالایی برخوردار است.

۶- مراجع

1. Moshtaghian, M. and Vahedi, Kh. "Penetration Analysis of a Projectile into a Ceramic/Composite Armor", Aero. Mech.J .Vol. 6, pp. 81-94, 2010 (In Persian).
2. Wilkins, M.L. "Mechanics of Penetration and Perforation", Int. Engngsci, Vol. 16, pp. 793-807, 1978.